

М. Д. Бородина*, С. В. Данилов

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург

**b.m.borodina@gmail.com*

Научный руководитель – проф., д-р техн. наук *М. Л. Лобанов*

НАСЛЕДОВАНИЕ ТЕКСТУРЫ ПРИ $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ -ПРЕВРАЩЕНИЯХ В МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ

Методом ориентационной микроскопии исследованы текстуры образцов малоуглеродистой низколегированной стали после контролируемой термомеханической обработки (ТМСП) и последующих термических обработок, включающих двойную фазовую перекристаллизацию. После термических обработок в полученных структурах (бейнит, мартенсит, феррит) наблюдались текстуры, ориентировки которых были связаны с основными ориентировками аустенита при его горячей деформации в процессе ТМСП ориентационными соотношениями (ОС), промежуточными между ОС Курдюмова – Закса и Нишиямы – Вассермана. Во всех случаях факт ориентационной связи компонент текстур объяснен началом реализации фазовых превращений на специальных границах.

Ключевые слова: трубные стали, контролируемая термомеханическая обработка, бейнит, мартенсит, феррит, ориентационная микроскопия, текстура, ориентационные соотношения, специальные разориентации, специальные границы.

M. D. Borodina, S. V. Danilov

INHERITANCE OF TEXTURE AT $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ -TRANSFORMATION IN LOW-CARBON LOW-ALLOY STEEL

The textures of low-carbon low-alloy steel samples obtained by controlled thermomechanical processing (TMCP) and subsequent heat treatments including a double phase recrystallization was studied by EBSD. Texture was observed after the heat treatments in the resulting structures (bainite, martensite, ferrite). In the resulting textures, the orientations were associated with of the main orientations of the austenite at its hot deformation during TMCP by orientation ratios (OR) intermediate between OR Kurdymov – Sachs and Nishiyama – Wasserman. In all cases, the fact of the orientation due textures components explained the beginning of the implementation of phase transformations on CSL boundaries.

Keywords: pipe steel, TMCP, bainite, martensite, ferrite, orientation microscopy, texture, orientation ratio, CSL misorientation, CSL boundaries.

Учет закономерностей формирования текстуры позволяет оптимизировать процессы производства материалов за счет рационального выбора температурно-временных и деформационных интервалов технологических операций [1]. При производстве современных листовых трубных сталей используется контролируемая прокатка с управляемым ускоренным охлаждением (TMCP). В результате двух последовательно реализованных процессов – горячей деформации аустенита и сдвигового фазового превращения при регулируемом охлаждении – происходит формирование текстуры.

В случае сдвигового фазового $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения и выполнения определенных ориентационных соотношений (ОС) Нишиямы – Вассермана (Н-В) или Курдюмова – Закса (К-З), а также отсутствия ограничений на места зарождения новой фазы при $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращении из одной ориентировки аустенита может возникать 12 (при выполнении ОС Н-В) или 24 (при выполнении ОС К-З) ориентировок аустенита, то есть при реализации сдвигового $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения невозможно существование какой-либо выраженной текстуры в материале.

Однако исследования листов трубных сталей, прошедших TMCP, показывают наличие выраженной текстуры [2, 3]. Появление ограниченного числа ориентировок, в исходно текстурованном материале в результате сдвигового $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения предполагает наличие неких структурных факторов, существенно ограничивающих возникновение всех возможных ориентаций кристаллитов при фазовой перекристаллизации [4].

Целью данной работы являлось исследование особенностей формирования структурно-текстурных состояний (бейнит, мартенсит, феррит) в листовой малоуглеродистой низколегированной трубной стали, полученной TMCP, после различных термических обработок (ТО – изотермическая закалка, закалка, полный отжиг), включающих двойную фазовую перекристаллизацию – $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$.

В качестве материалов для исследований использовались образцы листовой малоуглеродистой низколегированной трубной стали типа 06Г2МБ с бейнитной структурой после TMCP. Образцы подвергались различным ТО, при которых в материале дважды происходило фазовое превращение: $\alpha' \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha'$ или $\alpha' \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ с целью получения структур различного типа, таких как бейнит, мартенсит, феррит. Исследование проводилось методом ориентационной микроскопии (EBSD) с использованием ориентационных карт и соответствующих им функций распределения ориентировок (ФРО).

Текстуры всех образцов вне зависимости от механизма превращения при охлаждении (сдвигового или диффузионного) были отличны по

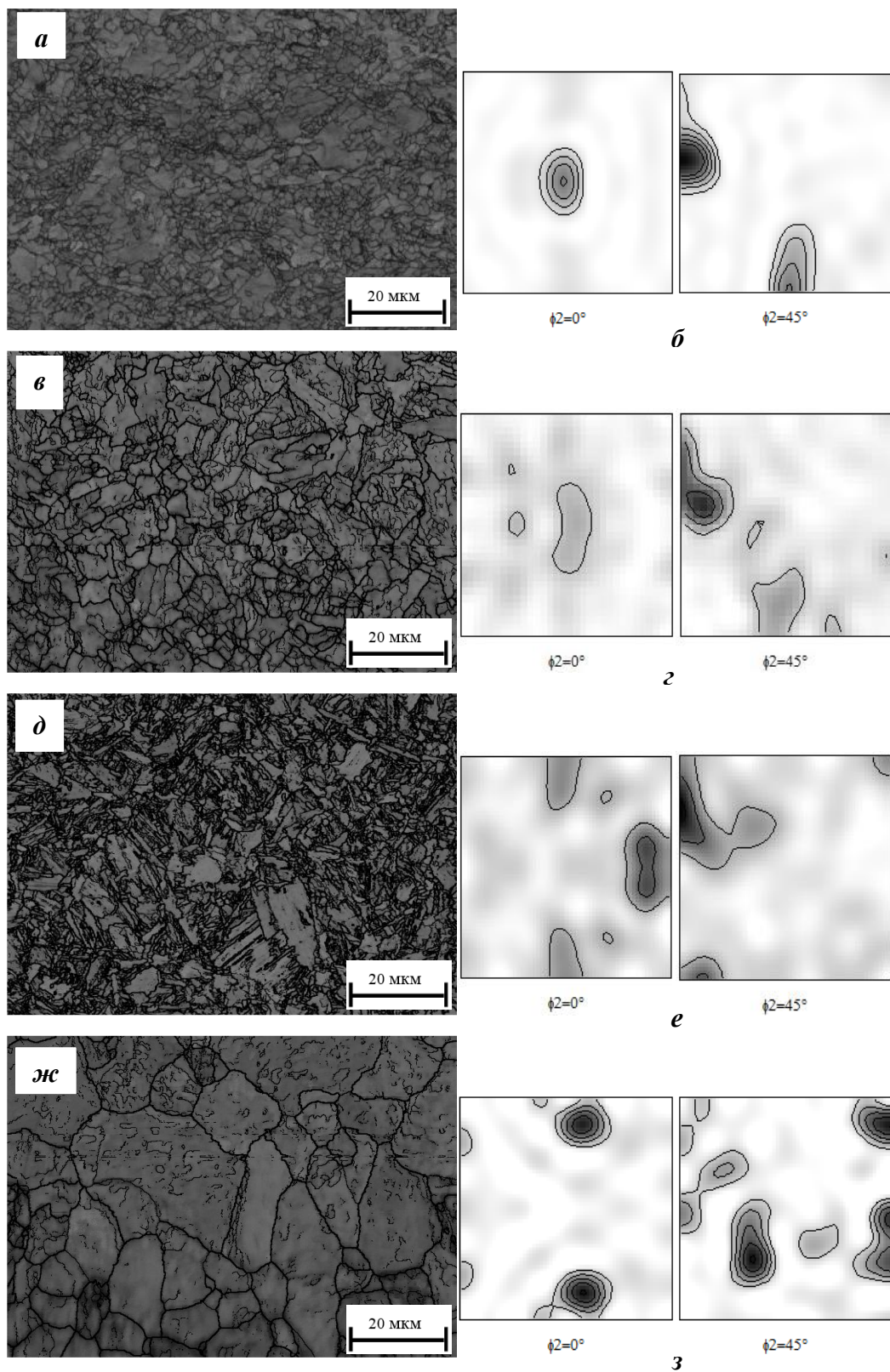
основным ориентировкам друг от друга. Анализ кристаллографической взаимосвязи компонент текстуры в структурах, полученных после ТМСП и после ТО, показывает, что все они могут быть получены в соответствии с ОС промежуточными между ОС К-3 и Н-В из основных ориентировок текстуры прокатанного аустенита: $\{112\}\langle 111\rangle$, $\{110\}\langle 111\rangle$, $\{110\}\langle 112\rangle$, $\{110\}\langle 001\rangle$ (рисунок).

Основные ориентировки бейнита после ТМСП и после ТО совпадают. Последнее предполагает реализацию в материале определенной текстурной наследственности – основные компоненты текстуры аустенита (стабильные ориентировки при деформации ГЦК-решетки [5]) трансформируются в дискретный набор ориентировок бейнита при ТМСП. При последующем нагреве ориентировки бейнита трансформируются в текстуру аустенита, совпадающую с текстурой γ -фазы при ее изотермической деформации (при ТМСП). Изотермическая закалка восстановленного аустенита приводит к формированию бейнитной структуры с присущим ей набором компонент текстуры.

По-видимому, подобная текстурная наследственность, но с вариациями, связанными с механизмами фазовых превращений, имеет место как при закалке на мартенсит, так и при полном отжиге, в результате которого формируется равновесный феррит. Подобный механизм эволюции текстуры при фазовых превращениях предполагает наличие в структуре материала после ТМСП (точнее, после горячей деформации) неких факторов, ответственных за наследственность. Согласно [6], подобным фактором могут служить специальные границы $\Sigma 3$ и $\Sigma 11$ между деформированными при горячей прокатке аустенитными зернами, дополнительно зафиксированными выделениями карбидных фаз.

Вызывает интерес то, что набор специальных разориентаций, зафиксированный в мартенсите и в бейните, характерен для феррита, который является продуктом диффузионного превращения. Можно предположить, что диффузионное превращение начинается на подложках, имеющих упорядоченное строение, и эти подложки ориентируют зародыши фазы. В качестве подобных подложек могут выступать уже упомянутые специальные границы $\Sigma 3$ и $\Sigma 11$. Полученные в работе результаты хорошо согласуются с данными [7, 8].

Работа выполнена в рамках проектной темы Минобрнауки РФ (задание № 11.1465.2014/К). Авторы выражают признательность за содействие программе поддержки ведущих университетов РФ в целях повышения их конкурентоспособности №211 Правительства РФ № 02.А03.21.0006.



Микроструктура и текстура (в виде ФРО) образцов малоуглеродистой низколегированной стали: *а, б* – после ТМСР (бейнит); *в, г* – после изотермической закалки (бейнит); *д, е* – после закалки (мартенсит); *ж, з* – после полного отжига (феррит);

ЛИТЕРАТУРА

1. Улучшение технологии производства сверхтонкой электротехнической анизотропной стали / М. Л. Лобанов [и др.] // Сталь. 2015. № 12. С. 63–67.
2. Ray R., Jonas J. J. Transformation textures in steels // International Materials Reviews. 1990. V. 35. P. 1–36.
3. Texture in hot rolled austenite and resulting transformation products / B. Hutchinson [et al.] // Materials Science and Engineering A – Structural materials properties microstructure and processing. 1998. V. 257. № 1. P. 9–17.
4. Структурная и текстурная наследственность при $\gamma \leftrightarrow \alpha$ превращениях в малоуглеродистой низколегированной трубной стали / М. Л. Лобанов [и др.] // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallurgy. 2016. Т. 16. № 2. С. 46–54.
5. Hölscher M., Raabe D., Lücke K. Relationship between Rolling Textures and Shear Textures in F.C.C. and B.C.C. Metals // Acta metall. mater. 1994. V. 42. № 3. P. 879–886.
6. Влияние кристаллографической текстуры бейнита на разрушение листов трубных сталей, полученных контролируемой термомеханической обработкой / И. Ю. Пышминцев [и др.] // Metallurg. 2016. № 4. С. 57–63.
7. Особенности формирования структуры и комплекса механических свойств трубной низколегированной Cr-Mo-V-стали после аустенитизации в межкритическом интервале температур / А. И. Степанов [и др.] // Сталь. 2014. № 6. С. 86–90.
8. Исследование специальных разориентаций в реечном мартенсите низкоуглеродистой стали методом ориентационной микроскопии / М. Л. Лобанов [и др.] // Физика металлов и металловедение. 2016. Т. 117. № 3. С. 1–6.